

論文 曲げとせん断を受けるRC部材の曲げひび割れ発生位置に関する考察

増田 有佑*1・南口 真一*1・岸本 一蔵*2

要旨：曲げとせん断を受けるコンクリート部材の曲げひび割れ発生位置を、引張側主筋とコンクリート間の付着および断面内の力の釣り合い状態をもとに算定する解析手法を示し、同手法の妥当性等について考察を行った。主筋の周長、部材長、軸力比をパラメータとした解析を行い、これらがひび割れ発生位置に与える影響について検討した。また解析結果と既往の実験結果の比較を行い、本論文で示した解析手法は実験値を大旨捉え得ることを示した。

キーワード：梁, 柱, ひび割れ位置, 解析手法, 付着

1. はじめに

建築物の耐震設計法では、被災後の使用性や、経済的視点からの補修の是非を容易に判断するため、被害程度を分類をより細かく規定する試みが行われてきている。このため、部材レベルにおける損傷度を明らかにすることが必要となり、コンクリート部材では「ひび割れ幅、ひび割れ長さ」を指標として用いることが有効とされている^{1)~3)}。2004年に出版された「鉄筋コンクリート造建築物の耐震性能評価指針(案)・同解説」では、RC柱部材の地震被災時における各種限界を示す値として、許容最大ひび割れ幅の値が残留ひび割れ幅と関連づけて示されているが、同指針にも記載があるように未だ十分な精度を有するとは言い難い。とくにヒンジ領域に発生するひび割れ間隔、つまり発生するひび割れ本数は、その数が最大ひび割れ幅に直接影響するため正確な算定が必要であり精度の高い算定法が必要である。

本論文は、地震時荷重すなわち曲げとせん断を受けるコンクリート部材のひび割れ本数を算定するため、ひび割れ発生位置を鉄筋とコンクリート間の付着および断面内の力の釣り合い状態をもとに算定する手法について考察する。

2. ひび割れ位置評価

2.1 算定対象とするひび割れ

曲げとせん断力を受ける部材では、最も曲げモーメントの大きくなる材端部あるいはその極近傍に最初(第一)のひび割れが発生し、作用する荷重の増大とともに順次材端より離れた位置でひび割れが発生する。本論文では第二番目のひび割れ、つまり材端ひび割れ発生後、その次に発生するひび割れの位置を求めることを目的とする(図-1)。なお、第三、或いはそれ以降のひび割れ位置については、第二ひび割れを求める手法を同様に適用することで計算可能になると考えている。

2.2 評価手法

本論文では、曲げとせん断を受ける部材において、「第二ひび割れ発生は、引張側コンクリートと引張側主筋間の付着により力が伝達され、引張側コンクリートのひずみ(応力)が曲げひび割れひずみ(強度)に達したところで発生する」という考え方を基本に計算を行った(図-1)。通常最初のひび割れ(第一ひび割れ)は部材端部に発生するため、第一ひび割れは既に発生していることを前提とする。つまり同図に示すように、部材端部の引張側では引張側主筋のみが引張力を負担しており、同位置でのコンクリートのひずみ(応力)は0であるとした。部材端部から材中央に近いほど、コンクリート-引張主筋間の付着作用により引張鉄筋の応力の一部がコンクリートに伝達されるため、コンクリートに作用する引張応力、すなわち引張ひずみは大きくなる。部材軸方向のあ

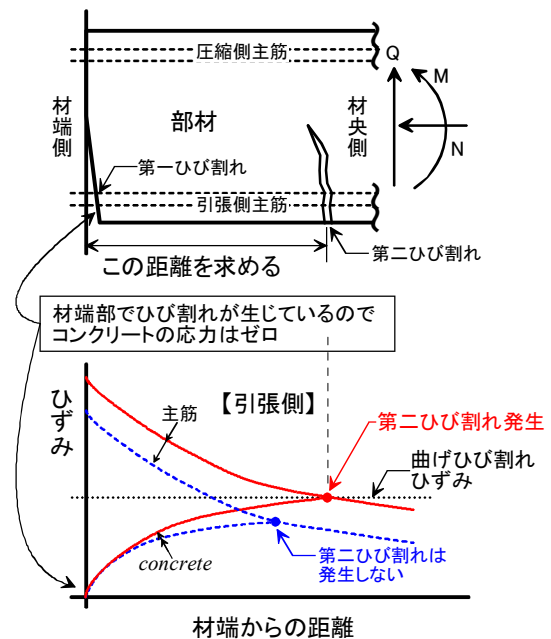


図-1 第二ひび割れ発生の考え方

*1 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 大学院生 (正会員)

*2 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

る位置で鉄筋ひずみとコンクリートの引張ひずみは一致し、その位置よりも材中央では両者のひずみは全く同じ値（スリップがない）となり、より材中央側では漸減していく。よって、コンクリートの引張ひずみは同点で最大となり、両者のひずみが一致する同点においてその値がコンクリートの曲げひび割れひずみに達した段階で第二ひび割れが発生すると考える。解析対象は図-2に示すように、梁、或いは柱部材を材軸方向に分割し、分割した各ブロック内の力の釣り合いおよびブロック間の力の伝達を考えるモデルとしている。なおブロック内での各パネのひずみ、応力は材軸方向には均一であると仮定しており、ブロックの状態は断面解析で得られる値に各ブロック長さを乗じた値で求めた。

解析のフローを図-3に示す。解析は、大きく二つの部分に分かれ、前半では仮の第二ひび割れ位置の算定を行い、ここから得られる値を条件としてより詳細な解析を後半で行っている。なお、仮の第二ひび割れ発生位置を計算する必要性については、2.4項で述べる。

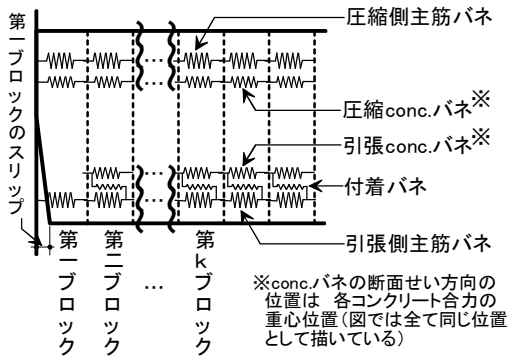


図-2 解析モデル

2.3 仮の第二ひび割れ発生位置の計算（フロー前半）

ここでは前述のようにコンクリート-鋼材間の付着によって、引張側主筋の力がコンクリートに伝達される条件を基に、コンクリートに発生するひずみがコンクリートの曲げひずみに達した時にひび割れが発生するとして第二ひび割れ発生位置を算定している。このとき、部材に作用するモーメント分布を考慮していないため、算定される値は概算値である。なお、引張力を負担するコンクリートの断面積は、文献4に従い、有効引張断面積の考え方を採用し、式(1)により算定している。

$$A_{ce} = (2C_b + \phi)b \quad (1)$$

ここで、b：梁幅、C_b：かぶり厚、φ：鉄筋の直径

また、コンクリート-鉄筋間の付着特性（付着強度-滑り量（τ-S）関係）については大野等の文献5を基にその形状をバイリニアとし、その剛性（K₁）および付着

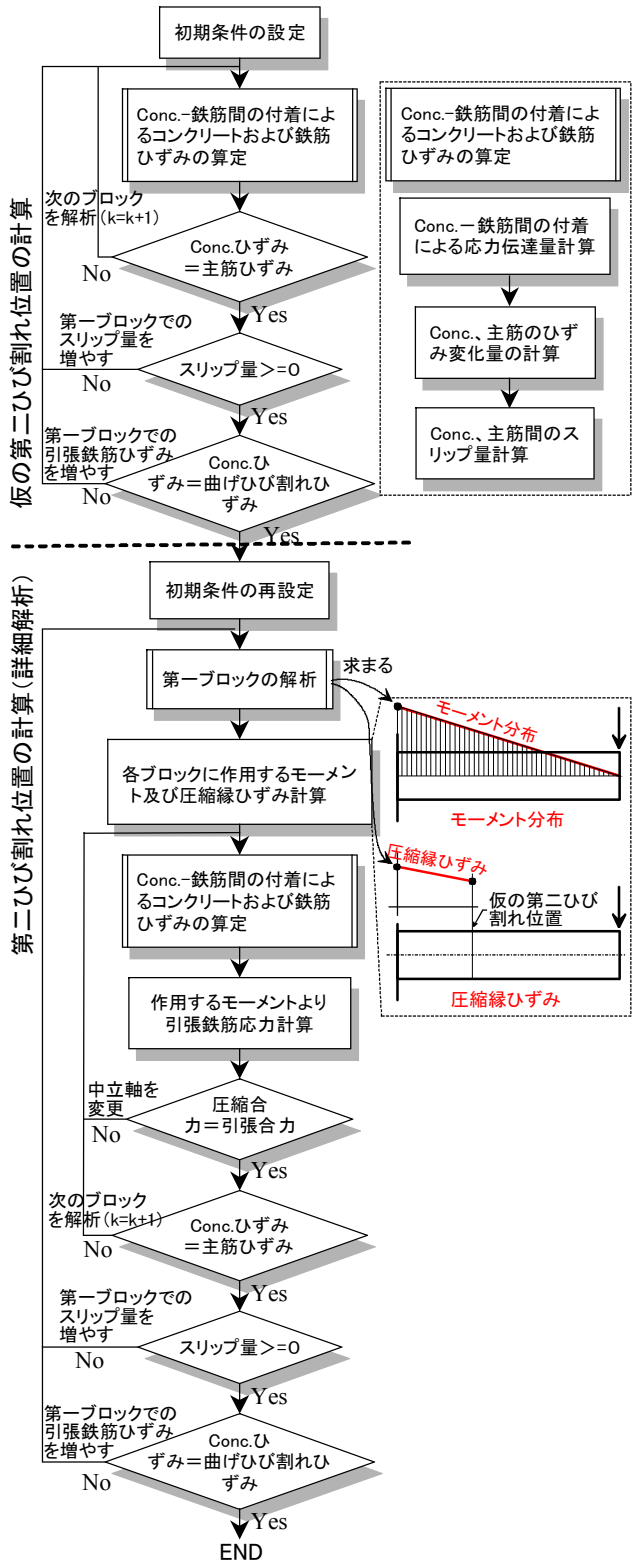


図-3 解析フロー

強度（τ_b）はそれぞれ式(2)、式(3)で計算した。

$$K_1 = 173 \times f_c^{0.166} \quad (N/mm^3) \quad (2)$$

$$\tau_b = 0.484 \times f_c^{0.617} \quad (N/mm^2) \quad (3)$$

ここで、f_c：コンクリートの圧縮強度（N/mm²）
コンクリートの曲げひび割れ強度（σ_p）については、

野口等の文献6で示される式(4)により求めた。

$$\sigma_f = 0.440 \times \sigma_B^{0.678} \quad (N/mm^2) \quad (4)$$

ここで、 σ_B : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

なお、図-3のフローで示す「Conc.ひずみ=主筋ひずみ」の判定については、実際の計算では「Conc.ひずみと主筋歪みの差が、Conc.ひずみの30%以下となった時点」として判定している。これは次のような理由による。Conc.ひずみと主筋ひずみの値が近くなると(スリップ量が小さくなるので)、付着により発生する力が低下し、図-4に示すように、両者のひずみ-材端距離を示す線が平行に近くなる。その結果、わずかな値の変動が結果を大きく変えてしまい解が安定しない。そこで、解が安定する条件として前述のような判定を行うこととした。

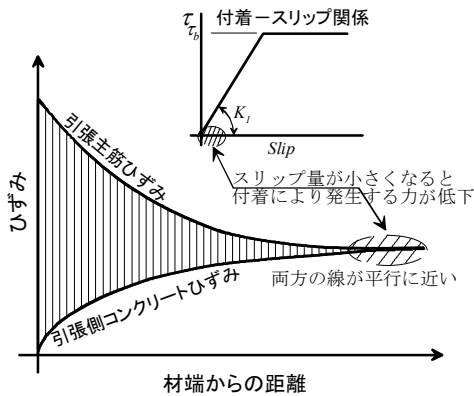


図-4 引張側主筋とコンクリートのひずみの一致する点について

2.4 第二ひび割れ発生位置の計算 (フロー後半)

後半の解析では、前半で求めた仮の第二ひび割れ発生位置の値を利用し、曲げモーメントの変化(材端から材中央に向かって減少する)を考慮して第二ひび割れ発生位置を求める。すなわち、各ブロックでは引張側コンクリート-主筋間の付着による両者間の力のやりとりと同時に、作用する曲げモーメントを満足することを条件に部材解析を行い、第二ひび割れ位置を求める。具体的な手法を図-3のフローに従い説明を行う。

(1) 第一ブロックの解析

部材端では既に第一ひび割れが発生しているため引張側コンクリートには力は発生していない、従って第一ブロック内の状態は、圧縮側コンクリート、圧縮側主筋、引張側主筋の力および軸力が分かれば確定できる。引張側主筋のひずみは条件として与えられる(プログラム中で収束計算される値のため、引張合力(=圧縮合力)は求まるが、平面保持の仮定が成り立たないため、中立軸位置或いは圧縮縁ひずみのどちらかを決定しなければ状態を確定できない。そこで、第一ひび割れ位置での圧縮縁ひずみの値を仮の第二ひび割れ位置での圧縮縁ひずみの1.2~1.4倍した値(軸力大きさにより変わる)

と仮定し、そこから中立軸位置を計算し状態を確定する。部材のモーメント分布は第一ひび割れ位置で最大であるため、同位置での圧縮縁ひずみは当然第二ひび割れ位置での値よりも大きい。また各ブロックでの中立軸位置は、(本検討で対象としている範囲では)材中央ほど大きくなる。従って、上記の2つの条件を満たす最小の倍率(第一ブロックでの圧縮縁ひずみ/第二ブロックでの圧縮縁ひずみ)を繰り返し計算により求め、その値を先に述べた倍率として用いた。

(2) 各ブロックに作用するモーメントおよび圧縮縁ひずみの計算

第一ブロックの状態が確定したので材端モーメントが求まり、そこから各ブロックに作用するモーメントが計算できる。第二以降の各ブロックのモーメントが上記のモーメントと一致するように圧縮側、引張側のコンクリート、主筋それぞれの状態を確定するが、第一ブロックと同様、引張側では平面保持の仮定が成立しない。このため各ブロックの圧縮側コンクリートのひずみを、第一ブロックと仮の第二ひび割れ位置のブロック間で線形補完して与えるとした。引張側主筋のひずみは前半の解析と同様収束計算により求める。すなわち、コンクリートと主筋間の付着により主筋からコンクリートに力が伝達され鉄筋応力(ひずみ)が減少するという点を考慮した上で、ブロック内での圧縮、引張力の釣り合い条件を満たし、かつブロックに作用するモーメント(前工程で求めた値)を満足するように収束計算を行う。以上の作業を順次各ブロックに対して行い、引張側コンクリートと主筋のひずみが一致し、かつその値がコンクリートの曲げひび割れひずみの値となった時点で解析を終了する。

3. 解析手法および解析条件

本節では、2節に示した解析手法により求まる第二ひび割れ位置が、解析条件にどの様に影響を受けるかを検討するため、主筋の周長、部材長、軸力比をパラメータとした解析を行った。図-5に解析対象とした部材断面および解析パラメータを示す。

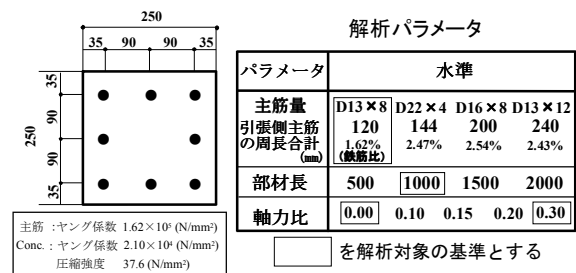


図-5 解析対象断面

3.1 解析結果

(1) 主筋の周長の影響

図-6に主筋の周長が異なる場合の第二ひび割れ位置—材端部間の距離（以下 ひび割れ位置）の違いを軸力比別（軸力比0, 0.3）に示す。同図によれば軸力比が0の場合、主筋の周長が大きくなるほどひび割れ位置は小さくなっている。これは主筋の周長が大きくなるほどコンクリート—主筋間の付着面積が大きく、コンクリートに伝達される力が大きくなるため、より材端部に近い位置でひび割れが発生するものと考えられる(図-7)。これに対し、軸力比0.3の場合、主筋の周長が大きくなっててもひび割れ位置はほとんど変わらない。これは第二ひび割れ発生時の第一ブロックでのスリップ量を示した図-8から分かるように、軸力比が0.3の場合、スリップ量が軸力比0に比べ全体に小さく、かつ主筋の周長が大きいほど小さくなっていることに起因していると考えられる。即ち主筋の周長が大きいと、付着面積は大きくなるものの、第二ひび割れ発生時のスリップ量が小さく、単位面積当たりの付着力が小さくなるため(図-9)、結果的にひび割れ位置に大きな差があらわれないものと考えられる。

(2) 部材長の影響

図-10に部材長が異なる場合の第二ひび割れ位置—材端部間の距離（以下 ひび割れ位置）の違いを軸力比別（軸力0, 0.3）に示す。同図によれば軸力比が0.3の場合、部材長が長くなるほどひび割れ位置は大きくなっている。これは第二ひび割れ発生時の第一ブロックでのスリップ量を示した図-11から分かるように軸力比0の場合に比べスリップ量が小さく、付着力の差がひび割れ

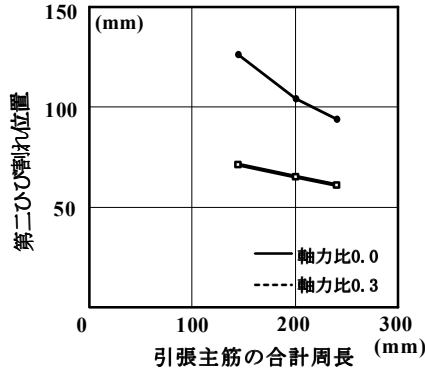


図-6 引張主筋の合計周長と第二ひび割れ位置の関係

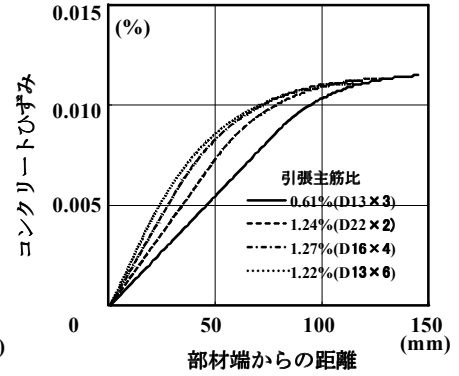


図-7 鉄筋量とコンクリートひずみの関係 (軸力比0.0)

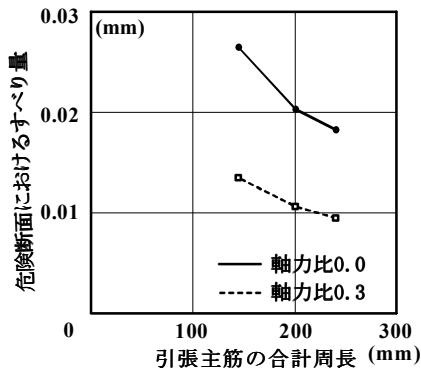


図-8 引張主筋の合計周長と危険断面におけるすべり量の関係

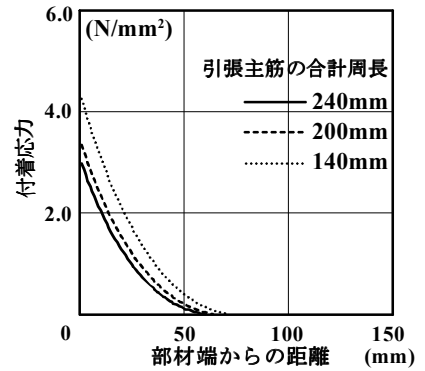


図-9 引張主筋の合計周長と付着応力の関係 (軸力比0.3)

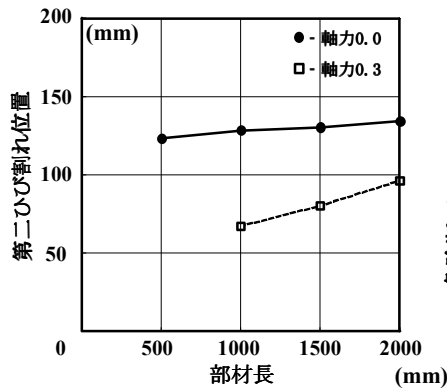


図-10 部材長と第二ひび割れ位置の関係

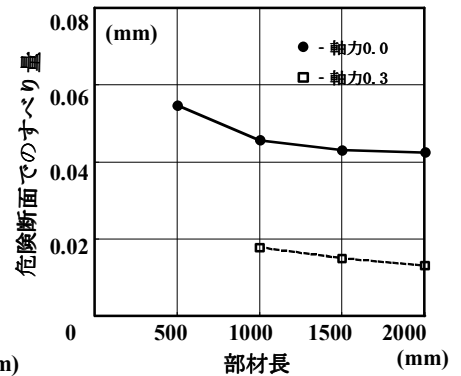


図-11 部材長と危険断面でのすべり量の関係

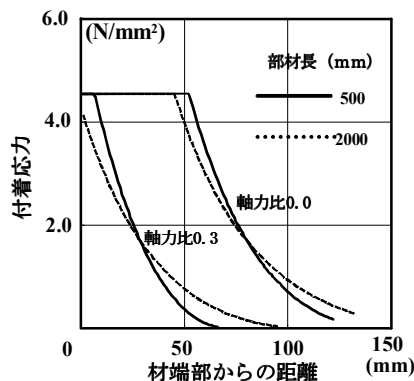


図-12 部材長と付着応力の関係

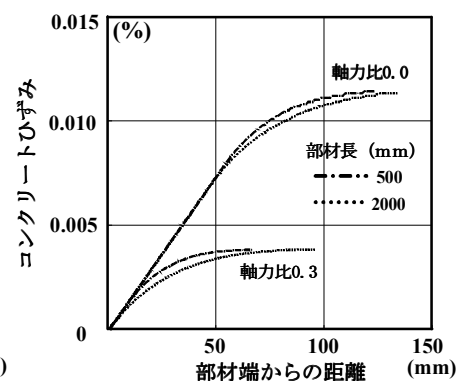


図-13 部材長とコンクリートひずみの関係

発生位置に大きく影響するためと考えられる(図-12)。これに対し、軸力比0の場合は、部材長が長くなるほどひび割れ位置は大きくなるが、軸力比0.3の場合と比べると増加率は小さい(図-10)。これは、軸力比0.3の場合と較べ第一ブロックでのスリップ量が全体に大きく、部材端から50mm程度の位置までは部材長の大小にかかわらずの付着応力が最大(4.5N/mm²)となっているため、それよりも材中央側で大きくなる付着力の差がひび割れ発生位置に大きく影響しないためと考えられる(図-12)。

(3) 軸力比の影響

図-14より、軸力比が大きくなると第二ひび割れ位置までの距離は小さくなるのがわかる。これは、解析中でのコンクリートの曲げひび割れひずみの設定方法に原因があると考えられる。以下にその原因を述べる。

断面にひび割れが発生するのは図-15(a)の左側の図が示すように、コンクリート引張縁が曲げひび割れ強度に達したときである。一方、本解析では2節で述べたように引張力を負担するコンクリートの断面積(有効引張断面積)を文献4に従い求めている(図-15(a)の右側の図)。

そのため解析時に曲げひび割れひずみの値として前者の値を直接用いることはできない。そこで、解析で用いる曲げひび割れの発生時ひず

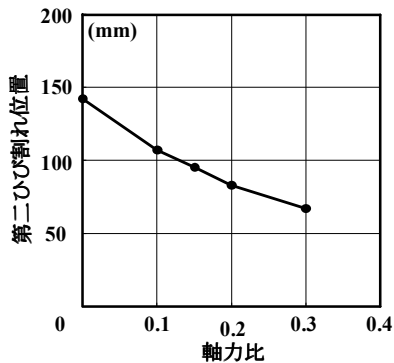


図-14 軸力比と第二ひび割れ位置の関係

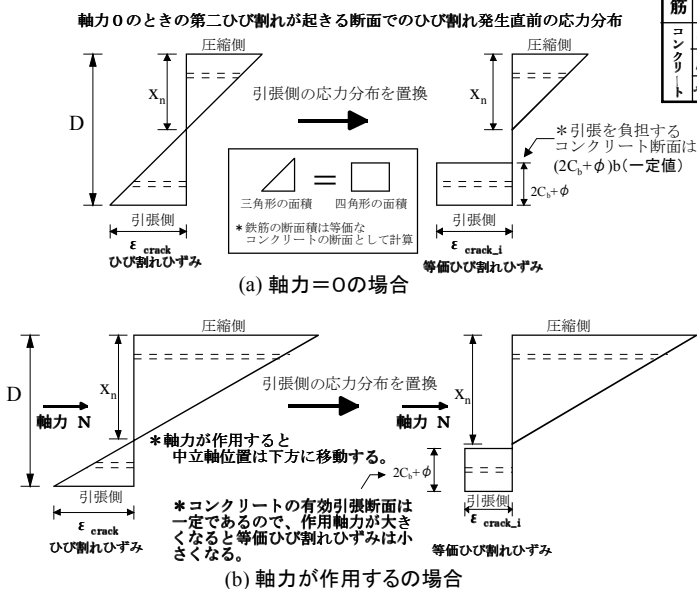


図-15 等価ひび割れひずみの考え方

み(等価曲げひび割れひずみ)をコンクリートの引張合力が一致するように定めた。すなわち同図中の引張側領域の三角形面積と四角形の面積が等しくなるようなひずみを曲げひび割れ発生時のひずみ(等価曲げひび割れひずみ: ϵ_{crack_i})とした。本解析では各ブロックの解析時に求まる引張側コンクリートのひずみを等価ひび割れひずみと比較し、これを越えたときにひび割れが入ると判定している。

この等価ひび割れひずみの値は、軸力の作用する断面の場合次のような影響を受ける。図-15(b)のように作用する軸力が大きくなると、引張側コンクリートが負担する引張力は小さくなる(三角形の面積が小さくなる)。この三角形応力分布を均一な四角形応力分布に置換するとき、有効引張断面積は軸力によらず一定値なの

表-1 試験体諸元及び材料特性

実験	大阪大学2007				大阪大学2006			建設省土木研究所
	① No.1	② No.2	③ No.3	④ No.1	⑤ No.2	⑥ No.3	⑦ No.4	
軸力比	0.00	0.15	0.30	0.28	0.11	0.28	0.35	0.00
断面 (mm×mm)	300×300			250×250			600×600	
部材長 (mm)	1200			1000			2800	
主筋	直径×全本数 引張強% D13×12 (0.56%)			D13×8 (0.61%)	D16×4 (0.64%)	D13×8 (0.61%)	D10×60 (0.32%)	
	引張強度 (N/mm ²)	-		426	512	495	-	
	降伏強度 (N/mm ²)	339		323	349	359	-	
	ヤング係数 (N/mm ²)	-		1.62×10 ⁴	1.67×10 ⁴	1.76×10 ⁴	-	
帯筋	直径@間隔	D10@80		D6@50			D6@45	
	帯筋比 (%)	0.60		0.51			-	
コンクリート	引張強度 (N/mm ²)	-		2.8		2.9		-
	圧縮強度 (N/mm ²)	30.1		37.6		42.7		39.9
	ヤング係数 (N/mm ²)	-		2.10×10 ⁴		2.43×10 ⁴		-

実験	鹿島建設				京都大学		東京工業大学	
	⑨ D-1	⑩ S-1	⑪ D-2	⑫ S-2	⑬ SUS ₁₂₂	⑭ S4N2	⑮ SUS ₁₂₂	⑯ SUS ₁₆₂
軸力比	0.10		0.30		0.20		0.00	
断面 (mm×mm)	250×250				270×270		500×500	
部材長 (mm)	900				700		2100	
主筋	直径×全本数 引張強% D13×8 (0.61%)			D10×12 (0.39%)		D25×6 (0.61%)	D25×8 (0.81%)	
	引張強度 (N/mm ²)	-		461		657.3		
	降伏強度 (N/mm ²)	-		330		368.6		
	ヤング係数 (N/mm ²)	-		1.65×10 ⁴		1.862×10 ⁴		
帯筋	直径@間隔	D6@50		D6@50 φ4@50		D13@100		
	帯筋比	0.51		0.53		0.23		0.50
コンクリート	引張強度 (N/mm ²)	-	-	-	-	3.28		-
	圧縮強度 (N/mm ²)	29.6	29.4	29.7	29.9	47.3		39.1
	ヤング係数 (N/mm ²)	2.62×10 ⁴	2.74×10 ⁴	2.72×10 ⁴	2.76×10 ⁴	2.55×10 ⁴		2.96×10 ⁴

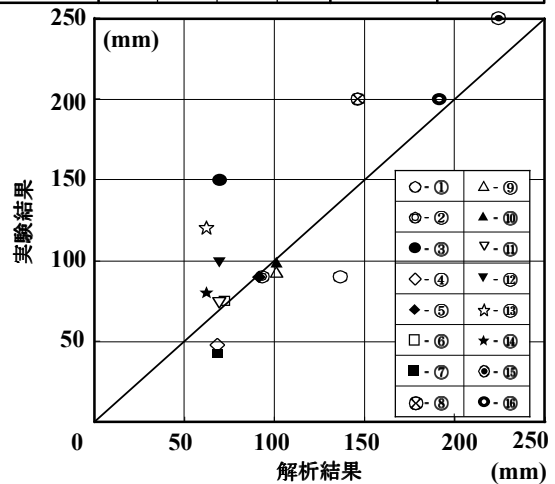


図-16 第二ひび割れ位置

で、等価ひび割れひずみ(ϵ_{crack_i})は小さくなる。よって軸力比が大きくなると等価ひび割れひずみ(ϵ_{crack_i})は小さく算定され、スタブ部から第二ひび割れ位置までの距離が小さくなると考えられる。従って、有効引張断面積の考え方をを用いているため、軸力が高い場合には軸力比の影響を正しく表していない可能性があり、解析手法の修正を含めた対応が必要と考えている。

4. 実験結果と解析結果との比較

本節では、既往の実験結果と解析値を比較し、2節で示した解析手法の妥当性について検討する。実験結果は既発表の論文のうち、ひび割れ図から第二ひび割れ位置が明確に判定できるもの、或いはそれらについて詳細な情報を入手可能なものからデータを得た。表-1に各試験体の諸元および材料の力学特性を示す。なお、コンクリートのヤング係数については文献に記載のあるものはその値を、記載の無いものはAIJのRC規準¹²⁾により圧縮強度からその値を求め解析に用いた。また実験値については、試験体が全てI型試験体による正負交番載荷であったため、柱頭、柱脚で各2箇所、合計4箇所得られる値を平均して実験値とした。

図-16は部材端から第二ひび割れ位置までの距離について実験値と解析値を比較したものである。実験数が少ないことから十分精度が確認できるわけではないが、本論文で示した計算手法はある程度実験値を捉えることが可能と思われる。

5. まとめ

曲げせん断を受けるコンクリート部材の曲げひび割れ発生位置を算定する解析手法について検討し、その妥当性を考察した。その結果を以下に記す。

- (1) 曲げとせん断力を受ける部材に発生するひび割れ本数を算定するため、ひび割れ発生位置を鉄筋とコンクリート間の付着および断面内の力の釣り合い状態をもとに算定する手法について示した。
- (2) 同手法によるパラメトリックスタディを行い、主筋の周長、部材長、軸力比が変化する場合の傾向について検討を行った。
- (3) 既往の実験でのひび割れ位置と解析値により得られるひび割れ位置を比較した。十分な精度が確認できるわけではないものの、解析値はある程度実験値を捉えることが可能である。
- (4) 引張力を負担するコンクリート断面積や、第一ひび割れ発生時のコンクリートの圧縮縁ひずみの算定方など、今後更なる検討が必要である。

【謝辞】

本論文を作成するにあたり、京都大学大学院 河野 進准教授、鹿島建設技術研究所 丸田 誠博士には貴重なデータを提供して頂きました。ここに記して感謝の意を表します。なお本研究は、平成 21 年度科学研究費補助交付金 基礎 C 一般（課題名：地震荷重を受けた後の鉄筋コンクリート構造部材の耐久性と許容ひび割れ幅、代表：岸本一蔵）の助成を受けて行われたものである。

【参考文献】

- 1) 安富 陽子, 河野 進, 下澤 正道, 渡邊 史夫: 一定軸力を受ける RC 柱の残留ひび割れの定量化, 日コンクリート工学年次論文集, 27 巻, 2 号, pp.259-265
- 2) 五十嵐 さやか, 曹 炳玟, 前田 匡樹: 曲げ降伏先行型 RC 柱部材の損傷量に基づく修復性評価モデルの構築に関する基礎研究, 31 巻, 2 号, pp.901-906, 2009.7
- 3) 高橋 典之, 高橋 絵里, 中埜 良昭: 鉄筋コンクリート部材のひび割れ量推定モデルの検証, 日コンクリート工学年次論文集, 31 巻, 2 号, pp.859-865, 2009.7
- 4) 日本建築学会: プレストレスト鉄筋コンクリート(口種 PC) 構造設計・施工指針・同解説, 1992
- 5) 乾 智洋, 大野 義照, 中川 隆夫: 細径異形鉄筋とコンクリート間の付着応力-すべり関係のモデル化, 日コンクリート工学年次論文集, 31 巻, 2 号, pp.685-690, 2009
- 6) 野口貴文, 友澤史紀: 高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 472 号, pp.11-16, 1995.6
- 7) 金子 貴司, 田上 淳, 丸田 誠, 鈴木 紀雄: 鉄筋コンクリート柱部材の挙動に及ぼすひずみ速度の影響に関する実験的研究, 日コンクリート工学年次論文集, 26巻, 2号, pp.241-246, 2004
- 8) 佃 有射, 横田 弘, 二羽 淳一郎, 長瀧 重義: 水平載荷を受けるステンレス鉄筋を用いた RC 柱部材に関する実験的研究, 日コンクリート工学年次論文集, 29巻, 3号, pp.901-906, 2007
- 9) 浅津 直樹, 運上 茂樹, 星隈 順一, 近藤 益央: 軸方向鉄筋の座屈解析による鉄筋コンクリート橋脚も塑性ヒンジ長に関する研究, 土木学会論文集, I-56, pp.177-194, 2001.7
- 10) 王建男, 岸本一蔵, 任旭, 大野義照: 曲げせん断力を受ける鉄筋コンクリート柱のヒンジ領域に発生するひび割れ幅, 日コンクリート工学年次論文集, 28巻, 2号, pp.163-168, 2006
- 11) 王建男, 岸本一蔵, 大野義照: 鉄筋コンクリート柱の残留曲げひび割れ幅の評価, 日コンクリート工学年次論文集, 29巻, 3号, pp.145-150, 2007
- 12) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1999.1